

Таким образом, были рассмотрены различные методы увеличения уровня выходного сигнала как за счет поиска оптимальных параметров акустической системы, так и путем оптимального согласования с электронным трактом. В среде LabVIEW разработана программа, позволяющая находить

частотную зависимость коэффициента передачи при различных параметрах как самого акустического тракта, так и цепей согласования. Разработанная методика может применяться при создании и других типов акустоэлектронных устройств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грибкова Е. С., Перегудов А. Н., Шевелько М. М. О возможности создания датчиков угловой скорости на базе акустических волн // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. 2010. Вып. 52. С. 193–202.

2. Грибкова Е. С., Перегудов А. Н., Шевелько М. М. Особенности распространения объемных акустических волн во вращающихся твердых средах // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009. № 1. С. 53–58.

3. Пат. РФ № 2392625. Способ измерения угловой скорости / Е. С. Грибкова, Д. П. Лукьянов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько; заявл. 18.05.2009; опубл. 20.06.2010.

4. Пат. РФ №2397445. Чувствительный элемент гироскопа / Е. С. Грибкова, Д. П. Лукьянов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько; опубл. 20.08.2010.

5. Оценка предельной чувствительности твердотельных датчиков гироскопов на объемных акустических волнах / Е. С. Грибкова, В. А. Марусиченко, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 7. С. 84–90.

6. Дряхлов А. Ю., Перегудов А. Н., Шевелько М. М. Согласование узкополосных ПАВ-фильтров в низкочастотных трактах // Вопр. спецрадиоэлектроники. Сер. РЛТ. 1987. Вып. 16. С. 53–56.

7. Теоретические основы электротехники: справ. по теории электрических цепей / под ред. Ю. А. Бычкова, В. М. Золотницкого, Э. П. Чернышева. СПб.: Питер, 2008.

---

A. R. Kadyrova, A. I. Lutovinov, A. N. Peregudov, M. M. Shevelko  
*Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»*

## OPTIMIZATION OF ACOUSTIC SENSOR TRACT ON BULK WAVES

*An influence of acoustic system structural elements and the applying of matching circuits are considered in order to increase the transmission coefficient of the solid-state motion sensor using bulk acoustic waves.*

**Solid-state sensor, bulk acoustic waves, transmission gain**

---

УДК 535.4

В. Ю. Венедиктов, А. А. Севрюгин

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

## Экспериментальное исследование дифракционной эффективности динамической решетки в матричном фазовом модуляторе

*Представлено экспериментальное исследование реальной эффективности дифракции на решетке с треугольным профилем, записываемой в матричном фазовом модуляторе.*

**Жидкокристаллический модулятор света, голографическая решетка, динамическая голография, дифракционная эффективность**

В настоящее время тонкие динамические голограммы (ДГ) находят широкое применение при решении различных задач прикладной оптики,

например для динамической голографической коррекции искажений в оптических и лазерных системах [1], при обработке оптической инфор-

мации и т. д. Ранее для записи тонких динамических голограмм наиболее эффективными оказались так называемые оптически адресуемые жидкокристаллические пространственные модуляторы света (ОА ЖК ПМС) [2]. Это «сэндвичеобразные» устройства, содержащие слой жидкого кристалла (ЖК) и слой фотопроводника (ФП), к которым приложено напряжение. Характерные поперечные размеры такого устройства в плоскости ( $x, y$ ) – десятки миллиметров, а толщина слоя ЖК (вдоль оси  $z$ ) – несколько микрометров. Под воздействием излучения проводимость слоя ФП возрастает, что приводит к увеличению напряжения, приложенного к слою ЖК, и, следовательно, к изменению оптических свойств (двулучепреломлению) тонкого слоя ЖК. Использование таких элементов позволяет записывать эффективные тонкие динамические (перезаписываемые в реальном времени с максимальной частотой обновления 10...1000 Гц в зависимости от используемого типа ЖК и других параметров модулятора [1]) фазовые голограммы, структура которых в плоскости ( $x, y$ ) определяется картиной интерференции световых волн.

На данный момент все большую популярность приобретают электронно-адресуемые жидкокристаллические пространственные модуляторы света (ЭА ЖК ПМС). Данные устройства представляют собой матрицу из большого числа (до 2.3 млн) индивидуально адресуемых жидкокристаллических ячеек. Частота обновления всей матрицы может достигать нескольких килогерц. Простота использования таких устройств по сравнению с оптически адресуемыми модуляторами света обусловила их растущую популярность. К недостаткам подобных устройств стоит отнести прежде всего малую апертуру подобных устройств и меньшее, чем у ОА ЖК ПМС, разрешение записываемых голограмм.

**Дифракционная эффективность.** Одним из недостатков тонких голограмм является низкая дифракционная эффективность. При обычном «прямом» способе записи, т. е. при записи тонкой голографической решётки как картины интерференции двух лазерных пучков, её дифракционная эффективность (ДЭ) в +1-й и –1-й порядки дифракции не может превышать 33 % для синусоидального профиля или 40 % для прямоугольной решётки (меандра). Превышение указанных значений при использовании такой голограммы в качестве корректора приводит к высоким потерям энергии в оптической системе. Решением этой проблемы является асимметризация профиля голографической решётки, широко применяемая при создании разнообразных статических голограммных и дифракционных оптических элементов, известных также как киноформы.

В частности, в случае использования фазовой пропускающей решётки, профиль которой имеет вид прямоугольных треугольников, а глубина модуляции фазы составляет  $2\pi$ , её ДЭ в +1-й или –1-й порядок может достигать 100 %. При этом если общая структура интерференционной картины (голограммы), т. е. локальный период и направление полос, остаётся неизменной, то и структура поля, восстанавливаемого такой асимметризованной голограммой при дифракции в +1-й или –1-й порядок, будет в первом приближении такой же, как и при дифракции на исходной голограмме.

Ранее (см. [4]) были предложены методы асимметризации профиля штриха цифровым [5], [6], аналоговым (с телевизионным переносом и ЭА ЖК ПМС в петле обратной связи, [7]) методами, а также был обнаружен эффект самоасимметризации при достаточно высоких интенсивностях записываемых пучков (при глубокой модуляции фазы в решётке) и пространственной частоте решётки ( $20 \text{ мм}^{-1}$ ) [9]. Экспериментально были достигнуты ДЭ до 70–75 % для цифрового и аналогового подходов и 50 % – при самоасимметризации. При использовании же ЭА ЖК ПМС асимметризация не представляет никаких сложностей и производится при помощи ЭВМ.

В настоящее время бурное развитие электроники привело к значительному снижению цен на ЭА ЖК ПМС и сделало их намного более доступными. Для решения задач авторы использовали ЭА ЖК ПМС Pluto производства компании «Holoeye Photonics AG». Данное устройство обладает разрешением  $1920 \times 1080$  пикселей, шагом пикселей – 8 мкм, степенью заполнения (отношение рабочей площади пикселей к общей) 87 %, апертурой  $15.36 \times 8.64$  мм и способно создавать набег фазы в  $2\pi$  на длинах волн до 800 нм. Устройство основано на технологии LCoS (англ. Liquid Crystal on Silicon – жидкие кристаллы на кремнии). Была поставлена задача измерить дифракционную эффективность и линейность характеристики (зависимость фазового набег от подаваемого сигнала) данного модулятора.

Дифракционная эффективность ЭА ЖК ПМС, в свою очередь, ограничена двумя основными параметрами: пассивными потерями (при отсутствии управляющего напряжения на модуляторе) и цифровой природой самого устройства. Пассивные потери включают в себя потери на отражение (или пропускание) и паразитную дифракцию на внутренней структуре модулятора, представляющую собой не что иное, как решетку с

периодом, равным шагу пикселей (8 мкм для Holoeye Pluto). Суммарные пассивные потери для модулятора Holoeye Pluto находятся на уровне 40 %. Дополнительные потери обусловлены цифровой природой устройства и достаточно большим размером пикселей, что не позволяет получать, к примеру, идеальные пилообразные решетки. Тем не менее, заявленная ДЭ достигает 83 % для пилообразной решетки с шагом 16 пикселей и 40 % – для прямоугольной решетки. Дифракционная эффективность в данном случае указана без учета пассивных потерь (см. таблицу).

Решетка	Интенсивность в 0-й и ±1-й порядки, %		
	$I_{+1st}$	$I_{0th}$	$I_{-1st}$
Прямоугольная	40	1.8	40
Пилообразная 8 уровней	75	2.2	0.8
Пилообразная 16 уровней	83	1.6	0.5

Стоит отметить, что комбинирование ЭА ЖК ПМС и ОА ЖК ПМС позволяет устранить ряд недостатков обоих устройств, однако это значительно увеличивает стоимость подобных установок. В работе [10] приведен пример установки, где оптически адресуемый модулятор управляется электронно-адресуемым.

**Эксперимент.** Для измерения ДЭ была использована установка, состоящая из He-Ne-лазера, коллимационной системы, ЭА ЖК ПМС и линзы, фокусирующей дифракционную картину на измеритель мощности Lasercheck компании «Coherent». Данное устройство способно измерять с точностью  $\pm 5\%$  и разрешением 0.01 мВт мощность падающего излучения в широком диапазоне. На ЭА ЖК ПМС подавался пилообразный сигнал с шагом 10 пикселей и различной глубиной модуляции посредством персонального компьютера с установленным на нем ПО HoloeyeApplicationSoftware.

На рис. 1 представлен теоретический график ДЭ – зависимость интенсивности от амплитуды (глубины) пилообразной решетки для различных порядков. Сплошной линией 1 показана интенсивность в 0-й порядок дифракции, штриховыми 2 и 3 – интенсивность в +1-й и +2-й порядки соответственно, непронумерованные линии соответствуют интенсивности остаточной дифракции в -1-й, -2-й и высшие порядки.

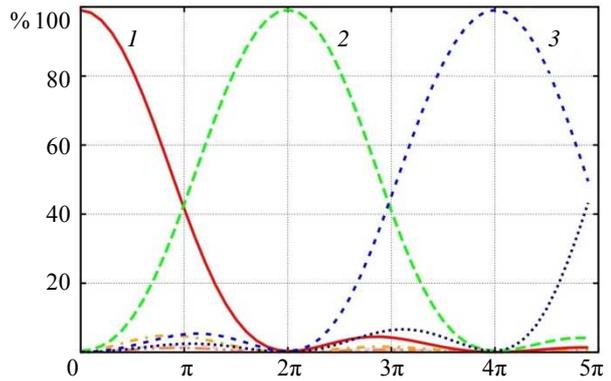


Рис. 1

На рис. 2 и 3 показаны графики зависимости мощности излучения в 0-й и +1-й порядки дифракции соответственно от амплитуды (глубины) решетки, построенные на основе экспериментальных данных. Непрерывной линией показаны ожидаемые результаты, экспериментальные же данные показаны отрезками, с учетом погрешностей.

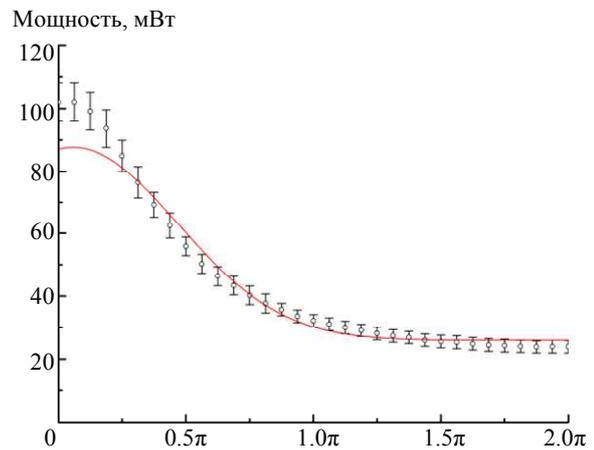


Рис. 2

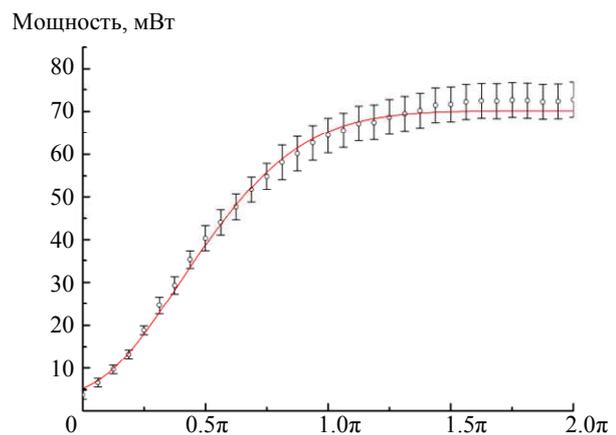


Рис. 3

Анализ экспериментальных данных и графиков показал, что использованный авторами прибор обладает хорошей линейностью выходной характеристики и достаточно высокой дифракционной эффективностью – около 72.5 %. Стоит

отметить, что управляющая программа была неспособна воспроизвести малые значения амплитуды решетки (см. рис. 2, в окрестностях нуля).

Полученные экспериментальные результаты близки к теоретически предсказанным и являются вполне корректными. Разница между экспериментальными и теоретически предсказанными результатами в большей степени вызвана несовершен-

ством управляющей программы и в меньшей – погрешностями при проведении измерений.

Развитие электроники в дальнейшем обещает уменьшить количество недостатков ЭА ЖК ПМС по сравнению с оптически адресуемыми, что в сочетании с простотой использования обеспечит им значительное преимущество в большинстве применений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пространственные модуляторы света / А. А. Васильев, Д. Касасент, И. Н. Компанец, А. В. Парфенов. М.: Радио и связь, 1987. 288 с.
2. High efficient electrically addressable spatial light modulator module for reconfigurable optical interconnection / H. Toyoda, Y. Kobayashi, N. Yoshida et al. // Meeting "Spatial Light Modulators and Integrated Optoelectronic Arrays". OSA Technical Digest. 1999. SMB3.
3. Blazed holographic optical aberration compensation / I. Percheron, J. T. Baker, M. Gruneisen et al. // Proc. of the 2nd Intern. Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine. London: World Scientific, 1999. P. 384–387.
4. Венедиктов В. Ю. Тонкие динамические голограммы с асимметричным профилем штриха решетки // Автометрия. 2012. Вып. 48, № 2. С. 20–29.
5. Венедиктов В. Ю., Фрейганг Н. Н. Асимметризация профиля динамической голографической решетки на основе сугубо локальной информации // Оптика и спектроскопия. 2008. Вып. 104, № 2. С. 347–351.
6. Венедиктов В. Ю., Ласкин В. А., Савинов В. А. Асимметризация профиля картины интерференции двух волн в реальном времени // Оптика и спектроскопия. 2010. Вып. 109, № 4. С. 675–677.
7. Аналоговая асимметризация профиля тонкой динамической голографической решетки в матричном жидкокристаллическом прозрачном элементе / В. Ю. Венедиктов, В. А. Ласкин, И. М. Пасечник, В. А. Савинов // Оптика и спектроскопия. 2010. Вып. 109, № 6. С. 1048–1050.
8. ОВФ низкоинтенсивного лазерного излучения в схеме с тонкой динамической голограммой и телевизионной передачей интерферометрической информации / А. А. Лещев, В. А. Беренберг, М. В. Васильев и др. // Квантовая электроника. 2007. Вып. 37, № 8. С. 716–719.
9. Прямая запись тонких динамических дифракционных решеток в оптически адресуемых пространственных модуляторах света с дифракционной эффективностью более 50 % / В. А. Беренберг, Н. В. Иванова, Н. А. Феоктистов, А. Н. Чайка // ЖТФ. 2008. Вып. 78, № 4. С. 99–103.
10. Gruneisen Mark T., DeSandre Lewis F. Programmable diffractive optics for wide dynamic range wavefront control using liquid crystal spatial light modulators // Optical Engineering. 2004. Vol. 43, № 6. P. 1387–1393.

V. Y. Venediktov, A. A. Sevryugin

*Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»*

## EXPERIMENTAL STUDIES ON DIFFRACTION EFFICIENCY OF DYNAMIC GRATING RECORDED ON MATRIX SPATIAL LIGHT MODULATOR

*A diffraction efficiency of the blazed-profile pattern with variable amplitude recorded on the Holoeye Pluto matrix spatial light modulator is analyzed.*

**Liquid crystal spatial light modulator, holographic grating, dynamic holography, diffraction efficiency**